

DAFTAR ISI

Daftar Isi	i
Prakata	vii
Susunan Panitia Seminar	viii
Pembicara Utama	ix
Gde Pradnyana (BP Migas)	
Eksplotasi dan Produksi Migas Lepas Pantai	
Daniel M. Rosyid (Dewan Pakar - Propinsi Jawa Timur)	
Potensi Migas Laut Jawa Timur Dan Strategi Pengembangan Industri	
Penunjang Berbasis Pada Kemampuan Daerah	
 Kelompok I	
Vivian Karim Ladesi, Eko Budi Djatmiko	
Analisis Keandalan Kekuatan Maksimum <i>Floating Storage Offshore</i> (FSO)	
Dengan Simulasi Monte Carlo	I-1
 Agoes Priyanto, Arifin	
Analisa Olah Gerak Pada Unit FPSO Melalui Model Eksperimen	I-10
 Baharuddin Ali, Samudro	
Aplikasi Roll Damping Untuk Optimasi Perancangan Roll Stabilizer FPSO	I-18
 Harsisto	
Bahaya Korosi Lokal Pada Jaringan Pipa Migas Di Lingkungan Laut Dalam	I-24
 Agoes Priyanto	
Efek Hidrodinamika Pelat Benam Pada Gaya Eksitasi Gelombang	
FPSO 89 KDWT	I-30
 Saifatur Rusli	
Eksplorasi Statigrafi Terumbu Karbonat Formasi Kujung Di Zona Ketapang,	
Laut Jawa Timur	I-37
 Iwan Aryawan	
Hydrodynamics of Floating Offshore Structures	I-43
 Wayan Mega Budiarta, Yetty Yustiati, Richard E. Moore	
Integrated Floatover Installation: Procedure Overview and Significant Issues	I-49
 Arief Suroso	
OTEC, Sumber Energi Dari Laut Dalam	I-53
 Arifin, Wibowo HN	
Pengaruh Arah Datang Arus Terhadap Beban Yang Ditimbulkannya	
Pada Tali Tambat Terminal FSO (Kajian Eksperimental)	I-59
 P. Indiyono	
Pengaruh Vortex-Induced Vibration (VIV) Pada Riser Untuk Struktur	
Offshore Pada Laut Dalam	I-66

Ahmad Khoirul Anam, Indra Ranu K., Surjo Widodo Adji Desain Pengendali Optimal LQG Pada Stabilitas Kapal Dengan Fin Stabilizers	III-64
Srijono Geomorfik Kelautan, Dan Potensi Geosesumbernya	III-71
Wolter R. Hetharia, Eliza R. De Fretes, Lexi A. Matatula Kajian Tentang Efek Trim Terhadap Daya Motor Induk Kapal-kapal Ikan Skipjack Pole and Line Di Perairan Maluku	III-76
Dominggus Sahuburua, Triwilaswandio Wuruk Pribadi, M. Tukan Material Supply Chain Study of Fishing Fleet Maintenance In Maluku Province	III-83
Munawar, Mukhtasor Model Stoikiometri Untuk Perkiraan Jumlah Nutrient Pada Bioremediasi Tumpahan Minyak Dengan Metode Biostimulasi Di Lingkungan Pantai	III-91
Mukhtasor, Totok Akbar Sriyudianto, Suyadi, Haryo D. Armono Pemodelan Oil Spills Di Perairan Laut: Studi Kasus Validasi Software OILMAPW	III-98
Aris Santoso, Alam Baheramsyah Penerapan Metode Simulasi Untuk Perencanaan Proses Evakuasi Dalam Keadaan Darurat Untuk Kapal Penumpang	III-105
Nurhayati Pola Arus Di Perairan Teluk Lada, Banten 2004	III-111
Agug Zuhdi M.F., Sukardi, Agung Setyawan Prediction of Potential of Biodiesel Feedstock as Suplement of Diesel Oil Fuel in Indonesia	III-119
Aulia S.A., Soegiono, A.A. Masroeri, I.N. Sutantra, Wasis, E.B. Djatmiko, K. Buda Robust Kontrol Pada Manuvering Kapal	III-125
Sarwoko Mangkoedihardjo Seleksi Teknologi Pemulihan Untuk Ekosistem Laut Tercemar Minyak (<i>Remediation Technologies Selection for Oil-Polluted Marine Ecosystem</i>)	III-134
Trika Pitana Shipboard Risk Security Assessment: Critical Review the Existing Methodology	III-140
Agoes Santoso Studi Pemilihan Propulsion Plant Untuk LNG Carrier Berbasis Efisiensi dan Emisi	III-151

PRAKATA

Bismillahirrahmanirrahiim,

Assalamu 'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Pertama, saya atas nama Panitia Pelaksana menyampaikan selamat datang kepada seluruh penulis, pemakalah, peserta, dan para undangan dalam acara Seminar Nasional Teori dan Aplikasi Teknologi Kelautan V - 2005. Seminar ini merupakan hasil kerjasama antara Fakultas Teknologi Kelautan ITS dengan Komunitas Migas Indonesia Cabang Jawa Timur serta didukung oleh RINA dan IMarEST Indonesia Branch. Adapun makalah-makalah yang masuk dan diterima untuk seminar ini sangat banyak dan rata-rata mempunyai kualitas kontribusi ilmiah yang tinggi. Meskipun telah melakukan proses editing terhadap format dan kesalahan-kesalahan kecil dari makalah, Panitia Pelaksana telah menjaga semaksimal mungkin keaslian dari isi makalah. Oleh karena itu, penulis makalah bertanggung jawab penuh atas isi, ide, gambar, tabel, dan daftar referensi yang ada dalam makalah.

Panitia Pelaksana telah berupaya keras untuk menjamin kualitas dari prosiding ini. Namun demikian atas nama Panitia, kami menyampaikan permohonan maaf yang sebesar-besarnya atas kesalahan cetak yang mungkin ada dalam prosiding ini. Akhirnya, atas nama Panitia Pelaksana, saya menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada para pemakalah, peserta, penyandang dana, dan pihak-pihak lain yang telah memberikan kontribusi baik secara langsung atau tidak langsung sehingga acara seminar ini dapat terselenggara dengan baik dan lancar. Kami berharap prosiding seminar ini dapat menjadi sumber referensi bidang teknologi kelautan yang sangat berharga untuk lebih memotivasi pelaksanaan riset-riset baru dalam bidang ini di masa-masa mendatang.

Wassalamu 'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh,

Ir. Alam Baheramsyah, MSc.Eng.

Ketua Panitia Pelaksana

SUSUNAN PANITIA SEMINAR

Panitia Pengarah

Ir. Asjhar Imron, M.Sc., MSE., PED., FRINA
Prof. Ir. Soegiono, FRINA
Prof. Dr. Ir. Widi. A. Pratikto, M.Sc.
Prof. Dr. Ir. Paulus Indiyono, MSc.
Harsono, FIMarEST
Stephen S. Rahmat
Ir. Ivan Taufan R.
Dr. Ir. Achmad Zubaydi, M.Eng.
Ir. Tony Bambang M., PgD.
Dr. Ir. Eko Budi Djatmiko, M.Sc.
Ir. Triwilaswandio Wuruk Pribadi, M.Sc.
Ir. Surjo Widodo Adji, M.Sc., CEng, FIMarEST
Ir. Imam Rochani, M.Sc.

Panitia Pelaksana

Ir. Alam Baheramsyah, MSc.Eng.
Abdillah Suyuthi, ST.
Dr. Aries Sulistyono
Dr. Ir. I K A Pria Utama, M.Sc., MRINA
Dr. Ir. Tri Achmadi
Dr. Ir. Djauhar Manfaat, MSc., MRINA
Dr. Ir. A. A. Masroeri, M.Eng.
Dr. Ir. Ketut Buda Artana, M.Sc.
Dr. Ir. Wahyudi, M.Sc.
Dr. Drs. Mahmud Mustain, M.Sc.
Dr. Ir. Mukhtasor, M.Eng.
Ir. Dwi Priyanta, MSE.
Ir. Yoyok Setyo H., MT
Ir. Agoes Santoso, MSc., MPhil.
Semin, ST., MT.
Indra Ranu Kusuma, ST., MSc.
Ir. Eddy Setyo K., MSc.

Fenty Zuhnidar
Dedy Kurniawan Wibowo
Denny Feranika
Ambar Rena Dewanti
Deasy C. Makagiansar
Agustin Dwi Sumiwi
Aris Santoso
Afan Farid Muarif
Ratna Nita Perwitasari
Rusmanto
Agung Setyawan
Cahyo Sasmito
Didik Setyawan
M. Agus P.
Fariz Maulana N.
Solikan

Model Stoikiometri untuk Perkiraan Jumlah Nutrient pada Bioremediasi Tumpahan Minyak dengan Metode Biostimulasi di Lingkungan Pantai

Munawar⁽¹⁾ dan Mukhtasor⁽²⁾

⁽¹⁾ Staf pengajar Universitas Pembangunan Nasional, sedang ikut program S3 Teknik Manajemen Pantai
Fakultas Teknik Kelautan ITS

⁽²⁾ Dosen Jurusan Teknik Kelautan, FTK-ITS

Abstract

It is well known that oil pollution in the marine environment may be caused by many different sources, including transport accidents, leakage of oil tanks and pipes, oil waste discharge, oil drilling, production, refineries, and transportation, and port loading and unloading activities. Without proper treatment, oil pollution in marine and terrestrial pollution may result in uncontrollable environmental damages. Various methods have been devoted in the past for remediating the oil spill in marine and coastal environment. Compared to physical and chemical methods, bioremediation have been proved as most effective method to cleanup oil spills with minimal or without problems. Bioremediation consists of bioaugmentation and biostimulation. Bioaugmentation (by adding microbial product to the polluted environment), in many bench scale and field studies, have been failed to remediate oil spills. Furthermore, it is expensive and needs specific technique. In other hand, biostimulation have been effective to degrade petroleum. Nutrient adding by using organic fertilizers (biostimulation) is a promising method to cleanup oil spill that should be developed. This paper present an approach in modeling the quantity of nutrient required for in situ treatment. The modeling for estimating the material needed for the bioremediation is based on the same principles used for all chemical reactions, i.e. the ratio of reactants. The ratio is dictated by the stoichiometric equation. Based on the equation, and a hypothetical case study presented here shows that the modeling approach might be potentially used to estimate the time and nutrients required for the bioremediation.

Keywords: Bioremediation, Biostimulation, Marine Pollution, Stoichiometry, Nutrients, Oil Spills

1. Pendahuluan

Perairan Indonesia merupakan jalur transportasi yang strategis yang menghubungkan negara-negara dari benua Amerika, Afrika, maupun Eropa yang akan menuju ke Asia Tenggara maupun Australia ataupun sebaliknya, serta terletak di antara negara-negara produsen di bagian barat dan negara-negara konsumen di bagian Timur. Meningkatnya eksplorasi minyak bumi dan gas di lepas pantai dan lalu lintas kapal tanker akan memperbesar risiko pencemaran minyak bumi di perairan Indonesia. Perairan Indonesia yang rawan akan terjadi tumpahan minyak yaitu Selat Malaka, Selat Lombok, Selat Sunda, dan Selat Makassar (Khomsin, 2004). Sebagai contoh, Selat Malaka dilalui oleh sekitar 200 hingga 300 kapal pengangkut migas per bulannya, termasuk di antaranya supertanker dan 90 tanker dan 30 tanker gas alam cair. Kapasitas tanker tersebut berkisar antara 500 ribu ton hingga 5 juta ton. Selain itu juga beroperasi sekitar 80 anjungan lepas pantai. Lalu lintas tanker yang padat dan tingginya aktifitas eksplorasi di lepas pantai membuka peluang terjadinya tumpahan minyak. Diperkirakan 7 juta barrel per hari minyak mentah melewati Selat Malaka, 0,3 juta barrel per hari melalui perairan selatan Pulau Sumatera, dan sebanyak 5 sampai 6 kapal tanker raksasa yang bermuatan lebih dari 250.000 ton melewati Selat Lombok dan Selat Makassar. Di samping itu, sebanyak 100-150 tanker domestik yang membawa minyak mentah dan produk minyak lain melalui Selat Makassar (www.kompas.co.id dalam Khomsin, 2004).

Tumpahan minyak yang terjadi di laut dapat menyebabkan pencemaran minyak di daerah pantai dan pesisir. Seperti diketahui, pesisir adalah daerah darat di tepi laut yang masih mendapat pengaruh laut, seperti pasang surut, angin laut, dan perembesan air laut. Sedang pantai adalah daerah di tepi perairan yang dipengaruhi oleh air pasang tertinggi dan air surut terendah (Triatmodjo, 1999). Selain itu, adanya beberapa instalasi pengolahan minyak yang terletak di daerah pesisir juga turut memperbesar risiko terjadinya pencemaran minyak di pesisir maupun pantai.

Untuk itu perlu dilakukan langkah-langkah untuk menangani pencemaran minyak tersebut. Ada banyak metode yang dapat ditempuh untuk menanggulangi tumpahan minyak. Metode-metode tersebut secara garis besar dapat digolongkan menjadi metode fisika, metode kimia, dan metode bioremediasi. Metode fisika menanggulangi tumpahan minyak dengan menghilangkan atau membuang minyak yang tertumpah secara manual atau menggunakan alat-alat tertentu, tanpa melibatkan pemakaian zat kimia atau penguraian oleh organisme. Membuang minyak dengan menggunakan tangan (Hozumi dkk., 2000), mengalirkan minyak ke dalam beberapa kanal lalu merecovery minyak tersebut dengan menggunakan *vacuum truck* seperti yang dilakukan pada tumpahan minyak *Sea Empress* (Prince, 2003), mencuci dan mengalirkan kembali minyak ke lautan bebas lalu mengumpulkannya dengan menggunakan skimmer seperti yang dilakukan setelah terjadi tumpahan *Exxon*

Valdez (Prince, 2003), memotong dan membuang vegetasi yang tercemar oleh tumpahan minyak (Pezeshki dkk., 2000), atau membakar (*in situ burning*) daerah rawa pantai yang terkena tumpahan minyak (Allen dan Ferek, 1993 dalam Pezeshki dkk., 2000), adalah beberapa contoh metode fisika yang pernah dilakukan untuk menanggulangi tumpahan minyak. Metode fisika bisa dilakukan dengan cepat setelah terjadi tumpahan dan seringkali menjadi pilihan pertama (Prince, 1997), akan tetapi metode ini bergantung pada tenaga manusia, padahal minyak seringkali mengandung zat beracun bagi manusia (Hozumi dkk., 2000). Dengan menggunakan metode pembakaran, yang dikenal relatif mudah dan efisien, penanggulangan tumpahan minyak menimbulkan permasalahan baru: polusi udara (Gogoi dkk., 2003).

Sementara itu, cara kimia menanggulangi tumpahan minyak dengan menggunakan zat-zat kimia seperti dispersan, *cleaners*, atau pengoksidasi tanah (*soil oxidizer*) (Pezeshki, 2000). Dispersan, menurut US-EPA, adalah semua zat kimia yang mampu mengemulsikan, mendispersikan, atau melarutkan minyak ke dalam kolom air atau mampu meningkatkan penyebaran minyak dalam kolom air (Nichols, 2003). Pemakaian dispersan dilaporkan efektif dalam menangani tumpahan minyak (Nagy dkk., 1984; Linden dkk., 1985 dalam Hozumi dkk., 2000). Akan tetapi, zat-zat kimia yang digunakan sebagai dispersan maupun emulsi zat-zat ini dengan minyak dapat menyebabkan organisme air mengalami keracunan (Wells dan Keiser, 1975; Lomning dan Hagstrom, 1976; Greenwood, 1983; Mori dkk., 1983, 1984 dalam Hozumi dkk., 2000), bahkan seringkali zat-zat kimia tersebut lebih beracun daripada tumpahan minyak itu sendiri (Burridge dan Shir, 1995 dalam Wrabel dan Peckol, 2000). Selain itu penggunaan dispersan amat terbatas, tidak bisa digunakan di daerah rawa karena di daerah ini jumlah airnya terlalu sedikit untuk melarutkan minyak yang terdispersi (OTA, 1990 dalam Pezeshki dkk., 2000). Dispersan lebih cocok bila digunakan di perairan-dalam dengan sirkulasi air yang bagus (Pezeshki dkk., 2000). Sementara *cleaners*, atau disebut *surface washing agent* oleh US-EPA, adalah semua zat yang mampu menghilangkan minyak dari permukaan padatan seperti permukaan pantai atau karang, melalui mekanisme detergensi, tanpa mendispersikan atau melarutkan minyak ke dalam kolom air (Nichols, 2003). *Cleaner* akan mencuci minyak dari permukaan karang atau vegetasi, lalu mengembalikan minyak tersebut ke perairan, lalu dikumpulkan dengan metode fisika (Fiocco dkk., 1991 dalam Pezeshki dkk., 2000).

Dalam hal ini, bioremediasi adalah salah satu teknologi alternatif yang mampu memperbaiki secara permanen lokasi yang tercemar tanpa mendatangkan masalah baru (Sims dkk., 1990 dalam Gogoi dkk., 2003). Bioremediasi merupakan cara untuk mempercepat penguraian polutan minyak secara alami, dan oleh karenanya merupakan solusi ramah lingkungan bagi permasalahan polutan minyak. Ada dua pendekatan yang digunakan untuk bioremediasi. *Pendekatan Pertama* berkaitan dengan kapasitas metabolik dari populasi mikroba asli. Bioremediasi tipe ini disertai dengan modifikasi lingkungan, misalnya melalui aerasi atau penggunaan pupuk, untuk mengatasi faktor-faktor yang membatasi laju biodegradasi yang dilakukan oleh mikroba asli. Pendekatan ini juga sering disebut sebagai biostimulasi. Pada *pendekatan kedua*, atau yang lazim disebut bioaugmentasi, populasi mikroba tertentu ditambahkan ke lokasi yang terkontaminasi tumpahan minyak. Kultur biakan dipilih berdasarkan aktifitas penguraian hidrokarbonnya (Atlas, 1995). Meskipun teknik bioremediasi belum terlihat efektif untuk menangani pencemaran minyak pada perairan terbuka, tetapi metode ini efektif untuk membersihkan tumpahan minyak pada lingkungan pantai (Munawar dan Mukhtasor, 2005).

Cookson (1995) menyatakan bahwa rancangan bioremediasi memerlukan estimasi jumlah zat (termasuk nutrient) yang harus diberikan ke bioreaktor atau ke bawah-permukaan laut atau ke tanah untuk *in situ treatment*. Perhitungan ini menjadi dasar bagi penentuan ukuran fasilitas-fasilitas proses, seperti perpipaan, pompa, kontrol emisi, penyimpanan bahan kimia yang digunakan, dan biaya. Jumlah total dan laju pemberian (*rate of delivery*) zat ini diproyeksikan sebagai penerima elektron, pemberi elektron, substrat primer, kontrol pH, dan penambahan nutrient.

Semua reaksi biologis yang menghasilkan energi merupakan reaksi redoks (Cookson, 1995). Dalam hal ini, oksidasi senyawa organik kontaminan akan membebaskan sejumlah elektron. Oleh karena itu, senyawa organik ini sering disebut sebagai pemberi elektron (*electron donor*). Oleh karena itu, dalam proses bioremediasi, harus tersedia senyawa yang akan menerima elektron ini (*electron acceptor*) dalam jumlah yang cukup dan tipe yang sesuai. Beberapa penerima elektron yang lazim dikenal adalah oksigen, nitrat, sulfat, karbon dioksida, dan sejumlah senyawa organik (Cookson, 1995).

Tujuan penulisan ini adalah untuk menyajikan estimasi kebutuhan nutrien untuk bioremediasi tanah di wilayah pesisir pantai yang terkontaminasi tumpahan minyak. Prinsip yang digunakan dalam estimasi ini sama dengan prinsip yang digunakan pada semua reaksi kimia, yaitu bahwa perbandingan jumlah mol zat-zat yang bereaksi, baik reaktan maupun produk, ditunjukkan oleh persamaan stoikiometri. Untuk proses bioremediasi, perhitungannya membutuhkan persamaan kesetimbangan redoks.

2. Langkah-langkah Estimasi Kebutuhan Akseptor Elektron dan Nutrient

Untuk sejumlah tertentu kontaminan per massa tanah atau per volume air-tanah, kuantitas total zat-zat yang bereaksi dapat dihitung dari reaksi kesetimbangan. Meskipun estimasi sering didasarkan pada perbandingan reaktan tipikal, penulisan reaksi kesetimbangan perlu dilakukan. Penulisan ini perlu dilakukan mengingat, pertama, perbandingan-tipikal reaktan pada proses bioremediasi seringkali tidak diketahui. Kedua, estimasi jumlah by-product, seperti CO₂, selama bioventing (optimasi bioremediasi dengan pemberian udara) seringkali dibutuhkan. Ketiga, perbandingan reaktan bervariasi menurut model metabolis yang dipilih dan sifat-sifat nutrient yang diberikan. Akhirnya, kemampuan untuk mengembangkan persamaan stoikiometri akan memberikan pemahaman mengenai perbedaan antara studi kelayakan (*treatability*) di laboratorium dan respon di lapangan. Perbedaan ini bisa disebabkan oleh kebutuhan oksigen alami, underestimasi terhadap beban organik asli, atau laju pemakaian yang rendah yang dapat diakibatkan oleh rendahnya distribusi suplemen (Cookson, 1995).

Estimasi kebutuhan proses terdiri dari beberapa langkah. Pertama, data lapangan mengenai jenis dan konsentrasi kontaminan serta nutrient yang telah tersedia harus dicari. Langkah berikutnya adalah mengubah data lapangan tersebut menjadi massa kontaminan. Perhitungan ini tergantung dengan tingkat akurasi yang diinginkan dan ketersediaan data lapangan. Bila massa kontaminan telah diestimasi, langkah berikutnya adalah mengembangkan reaksi kimia yang terlibat dalam proses bioremediasi (Cookson, 1995). Melalui reaksi kimia inilah nantinya akan diketahui perbandingan mol akseptor elektron dan nutrient yang dibutuhkan.

3. Kinetika Bioremediasi

Pengembangan persamaan stoikiometri dalam penguraian senyawa-senyawa organik menggunakan prinsip-prinsip persamaan reaksi redoks. Dalam hal ini, reaksi total harus meliputi oksidasi senyawa organik, reduksi penerima elektron, dan reaksi nutrient untuk pertumbuhan sel. Ada empat akseptor elektron dan dua bentuk nitrogen yang umum untuk nutrient (lihat Tabel 1). Reaksi overall dapat diberikan dalam bentuk umum sebagai

$$H_D + f_e H_A + f_s C_s \tag{1}$$

- di mana H_D = setengah-reaksi untuk oksidasi senyawa organik, donor elektron
- H_A = setengah-reaksi untuk akseptor elektron
- C_s = reaksi yang menyediakan kebutuhan nutrient bagi sintesis biomassa
- f_e = fraksi senyawa organik yang dioksidasi sehingga menghasilkan energi
- f_s = fraksi yang terdapat pada saat konversi menjadi sel-sel mikroba, $f_e + f_s = 1$

Untuk sistem aerobik, faktor f_e untuk distribusi energi ditemukan antara 0,12 dan 0,6 .Bila reaksi semakin lambat (semakin sulit komponen untuk diuraikan), maka nilai f_e semakin kecil. Fraksi energi bagi sintesis sel dalam sistem anaerobik lebih rendah daripada sistem aerobik. Jadi jumlah biomassa yang dihasilkan amat sedikit.

Tabel 1. Setengah Reaksi untuk Beberapa Reaksi Redoks Organik (McCarty, 1987 dalam Cookson, 1995)

Tipe Reaksi	Bentuk Umum Reaksi	Keterangan
Oksidasi kontaminan organik (Setengah reaksi donor elektron ~ H_D)	$1/Z(C_aH_bO_cN_d) + (2a - c/Z(H_2O) = a/Z(CO_2) + d/Z(NH_3) + H^+ + e^-$	$Z = 4a + b - 2c - 3d$; a, b, c, dan d menunjukkan jumlah rata-rata atom untuk C, H, O, dan N dalam kontaminan organik
Reduksi akseptor elektron (Setengah reaksi akseptor elektron ~ H_A)	1. $1/4O_2 + H^+ + e^- = 1/2H_2O$ 2. $1/6NO_3^- + H^+ + 5/6e^- = 1/12N_2 + 1/2H_2O$ 3. $1/8SO_4^{2-} + H^+ + e^- = S^{-2} + 1/2H_2O$ 4. $1/8CO_2 + H^+ + e^- = 1/8CH_4 + 1/4H_2O$	1. Respirasi oksigen. Terjadi bila proses berlangsung secara aerobik. 2, 3, dan 4 terjadi bila proses berlangsung secara anaerobik
Persamaan	1. $1/4CO_2 + 1/20NH_3 + H^+ + e^- = 1/20C_5H_7O_2N + 2/5H_2O$	1. Menggunakan

sintesis sel → C ₄	2. $5/28\text{CO}_2 + 1/28\text{NO}_3^- + 29/28\text{H}^+ + e^- = 1/28\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N} + 11/28\text{H}_2\text{O}$	ammonia sebagai sumber nitrogen 2. Menggunakan nitrat sebagai sumber nitrogen Komposisi struktur seluler: C ₅ H ₇ O ₂ N. Kebutuhan P:1/6 kebutuhan terhadap N
----------------------------------	---	---

4. Laju degradasi

Laju penguraian seringkali didasarkan pada penelitian laboratorium. Bila data tidak tersedia, data dari literatur bisa digunakan untuk mengestimasi laju penguraian. Bagi banyak penelitian, penguraian dinyatakan sebagai persamaan laju orde satu. Akan tetapi, banyak sistem lapangan yang mengikuti laju penguraian orde nol (Cookson, 1995). Persamaan orde satu diberikan oleh

$$\frac{dL}{dt} = -kL$$

(2)

atau

$$L_t = L_0e^{-kt}$$

(3)

di mana L = konsentrasi awal senyawa-senyawa organik (unit)
L_t = konsentrasi setelah penguraian selama waktu t (hari)
k = konstanta laju penguraian orde satu (unit per hari)

Laju penguraian dL/dt diberikan oleh persamaan (2) karena perbandingan massa hidrokarbon terhadap massa oksigen yang diperlukan adalah konstan, persamaan ini juga memberikan laju di mana oksigen dan nutrient terpakai. Laju pemakaian oksigen atau nutrient dihitung dari perbandingan massa oksigen atau nutrient terhadap senyawa organik dikalikan laju penguraian senyawa organik.

Laju pemakaian oksigen atau nutrient diberikan oleh

$$\frac{dN}{dt} = k(R_N)L_t$$

(4)

di mana dN/dt = massa (dalam lb) oksigen, nitrogen, atau fosfor yang diperlukan per hari
R_N = perbandingan massa oksigen, nitrogen, atau fosfor terhadap massa senyawa organik

Laju penguraian di lapangan lebih rendah karena lokasi mengandung campuran dari berbagai senyawa organik. Konstanta laju penguraian cukup rendah untuk beberapa zat kimia dan ini menghasilkan laju konstanta di lapangan yang semakin lama semakin mengecil (Cookson, 1995).

Perhitungan berbasis penelitian *treatability* sangat baik untuk mengestimasi waktu pembersihan dan ukuran peralatan, tetapi laju umpan aktual harus ditentukan menurut data lapangan (Cookson, 1995).

5. Stoikiometri: Studi Kasus Hipotetik Bioremediasi

Berdasarkan uraian di atas, akan diestimasi jumlah oksigen, nitrogen, dan fosfor yang dibutuhkan, jumlah CO₂ yang dihasilkan, serta estimasi waktu bioremediasi yang diperlukan untuk membersihkan tanah pesisir yang terkontaminasi oleh minyak bumi. Estimasi ini didasarkan pada kasus tumpahan minyak akibat kebocoran casing sumur minyak yang terletak di dekat selat Makassar, tepatnya di Blok Ranggas, Tanjung Santan, Kalimantan Timur. Pada peristiwa ini terdeteksi adanya lapisan tipis hidrokarbon di permukaan laut dan pesisir pantai (0,1%) pada luasan 27 x 19 mil atau sekitar 1.300 km² (Kompas, 28 September 2002). Setelah mengalami proses penguraian fisik, seperti disolusi, penguapan, dispersi, maupun pengendapan (Reed, 1989), maka memperkirakan bahwa konsentrasi tipikal minyak bumi pada tanah adalah sekitar 7000 ppm. Adapun, komponen-komponen tipikal penyusun minyak bumi beserta persentasenya masing-masing disajikan pada Tabel 2. Untuk aplikasi di lapangan nantinya, untuk mengetahui secara tepat konsentrasi dan komponen penyusun minyak bumi yang mencemari, perlu dilakukan penelitian awal di laboratorium.

Tabel 2. Komponen-komponen tipikal penyusun minyak bumi (Cookson, 1995)

Nama Senyawa	Rumus Kimia	Persentase
Pentana	C ₅ H ₁₂	17.14%
Xylene	C ₈ H ₁₀	11.43%
Benzena	C ₆ H ₆	14.00%
Toluena	C ₇ H ₈	5.71%
2,2-Dimetilheptana	C ₉ H ₂₀	11.86%
Benzena 1,2-diol	C ₆ H ₆ O ₂	21.00%
Asam butirat	C ₄ H ₈ O ₂	18.86%
Total		100.00%

Penguraian minyak bumi, baik di lingkungan darat maupun perairan, pada umumnya berlangsung secara aerobik. Oleh karena itu, bentuk persamaan stoikiometrinya dibentuk oleh ketiga setengah reaksi berikut:

- (i) $1/Z(C_3H_6O_cN_d) + (2a - c/Z(H_2O)) \rightarrow a/Z(CO_2) + d/Z(NH_3) + H^+ + e^-$
- (ii) $1/4O_2 + H^+ + e^- \rightarrow 1/2H_2O$
- (iii) $1/4CO_2 + 1/20NH_3 + H^+ + e^- \rightarrow 1/20C_5H_7O_2N + 2/5H_2O$

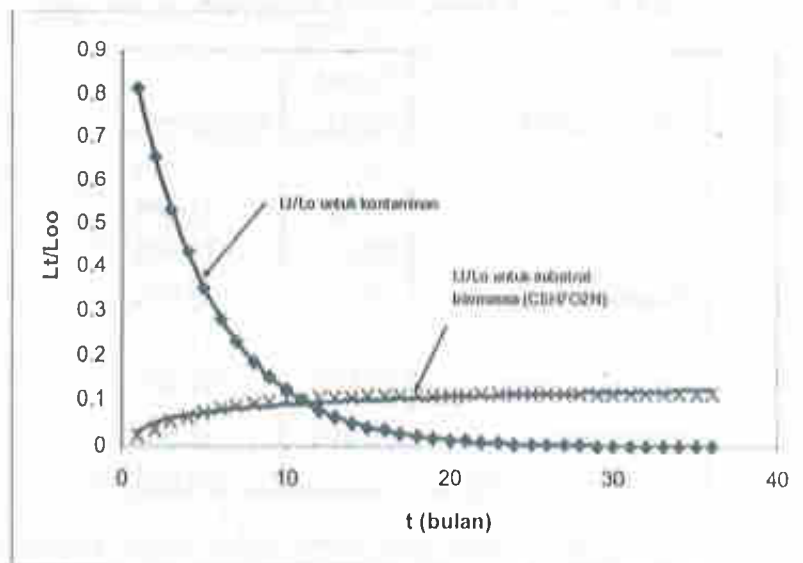
Dari hasil perhitungan, seluruh komponen penyusun minyak bumi yang tertera pada Tabel 2 di atas dapat diwakili oleh rumus kimia C₆H₁₀O. Bila ketiga reaksi di atas dijumlahkan menurut persamaan (1), dengan f₁ dan f₂ masing-masing sebesar 0.5, maka diperoleh reaksi overall sebagai berikut:



Bentuk stoikiometri di atas menghasilkan perbandingan berat C₆H₁₀O:O₂:N:P:CO₂ sebesar 1:1,31:0,114:0,019:0,9. Artinya dalam penguraian 1 kg kontaminan, dibutuhkan O₂ sebanyak 1,31 kg atau 917 liter (STP), N sebanyak 0,114 kg, P sebanyak 0,019 kg, dan dibebaskan CO₂ sebanyak 0,9 kg atau 887,04 liter (STP). Untuk proses bioremediasi tanah pesisir yang terbuka, di mana pertukaran oksigen berlangsung lancar, kebutuhan oksigen ini tidak menjadi masalah. Semua penelitian yang pernah dilakukan berkaitan dengan bioremediasi, baik itu pada skala microcosm, mesocosm, maupun penelitian di lapangan (Ramsay dkk., 2000; Prince dkk., 2003), tidak memerlukan treatment khusus, semisal injeksi oksigen, untuk memasok oksigen yang diperlukan oleh reaksi di atas.

Permasalahan kecil mungkin muncul berkaitan dengan kebutuhan N dan P. Perbandingan N:P yang dibutuhkan adalah 6:1, sementara pupuk yang beredar di pasaran memiliki perbandingan N:P = 1:6. Hal ini sebenarnya tidak menjadi masalah bila pupuk yang digunakan adalah pupuk organik semisal kompos. Kompos yang terbuat dari sampah organik rumah tangga yang kadar proteinnya relatif tinggi, menurut hemat penulis, mengandung banyak N. Pelletier dkk. (2004) juga mengatasi kendala ini dengan menggunakan pupuk kompos. Kompos ikan yang mereka pakai bahkan memiliki perbandingan N:P yang sangat tinggi, yaitu sekitar 17:1.

Penguraian polutan minyak bumi di lapangan biasanya berlangsung pada orde nol atau satu. Bila orde laju penguraian nol, maka akan dihasilkan hubungan konsentrasi-waktu yang linear. Sementara bila penguraian berlangsung pada orde satu, maka hubungan konsentrasi-waktu adalah eksponensial. Untuk menentukan orde reaksi ini, harus dilakukan penelitian lapangan (Cookson, 1995).



Gambar 2. Grafik hubungan L_t/L_o kontaminan dan substrat biomassa terhadap waktu (bulan). L_t/L_o adalah perbandingan konsentrasi kontaminan atau substrat pada t terhadap konsentrasi awalnya masing-masing

Gambar 2 di atas menunjukkan hubungan antara konsentrasi kontaminan atau substrat biomassa terhadap waktu dengan asumsi bahwa reaksi bioremediasi berlangsung menurut orde satu. Pada gambar tersebut tampak bahwa dari waktu ke waktu konsentrasi kontaminan semakin mengecil dengan pola eksponensial. Penurunan konsentrasi kontaminan ini diiringi oleh peningkatan jumlah substrat biomassa $C_5H_7O_2N$ yang dihasilkan oleh aktifitas mikroba.

Dari hasil perhitungan, untuk menangani tumpahan minyak di pesisir pada kasus di atas, dengan asumsi bahwa tumpahan minyak mencemari tanah setebal 5 cm dan konsentrasi 7000 mg minyak/kg tanah (Cookson, 1995), estimasi kebutuhan N dan P masing-masing adalah 15 ton dan 2,5 ton. Sementara itu, waktu yang dibutuhkan untuk bioremediasi adalah 3,8 tahun.

7. Kesimpulan

Kebutuhan nutrient untuk biostimulasi dapat diestimasi dengan menggunakan model stoikiometri dari reaksi kimia yang terlibat dalam proses bioremediasi. Untuk menentukan model stoikiometri, konsentrasi dan komponen penyusun minyak bumi yang mencemari suatu lokasi harus diketahui secara tepat. Oleh karena itu, sebelum melakukan bioremediasi, harus diadakan penelitian awal guna mengetahui konsentrasi dan komponen minyak bumi tersebut.

Pustaka

- Atlas, R.M. (1995). **Petroleum Biodegradation and Oil Spill Bioremediation**. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 31, No. 4-12, pp. 178-182.
- Cookson, Jr. John T. (1995). **Bioremediation Engineering design and Application**. McGraw-Hill, app B
- Gogoi, B.K., Dutta, N.N., Goswami, P., Mohan, T.R.K. (2003). **A Case Study of Bioremediation of Petroleum Hydrocarbon Contaminated Soil at A Crude Oil Spill Site**. *Advances in Environmental Research*, Vol. 7, pp. 767-782.
- Hozumi, T., Tsutsumi, H., Kono, M. (2000). **Bioremediation on the Shore after an Oil Spill from the Nakhodka in the Sea of Japan. I. Chemistry and Characteristics of Heavy Oil Loaded on The Nakhodka and Biodegradation Tests by a Bioremediation agent with Microbiological Cultures in the Laboratory**. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 40, No. 4, pp. 308-314.
- Khomsin (2004). **Aplikasi Remote Sensing untuk Mendeteksi Sebaran Tumpahan Minyak**. *Pencemaran Pantai dan Laut-PPS-FTK-TMP-ITS Surabaya*.
- Munawar dan Mukhtasor (2005). **Perkembangan Teknologi Bioremediasi untuk Penanggulangan Tumpahan Minyak di Wilayah Pesisir**, Makalah Pertemuan Ilmiah Tahunan II ISOI
- Nichols, W.J. (2003). **An Overview of the USEPA National Oil and Hazardous Substances Pollution Contingency Plan, Subpart J Product Schedule (40 CFR 300.900)**. *Spill Science & Technology Bulletin* Vol. 8, No. 5-6, pp. 521-527.
- Pelletier, E., Delille, D., Delille, B. (2004). **Crude Oil Bioremediation in sub-Antarctic Intertidal Sediments: Chemistry and Toxicity of Oiled Residues**. *Marine Environmental Research* 57, pp. 311-327.

- Pezeshki, S.R., Hester, M.W., Lin, Q., Nyman, J.A. (2000). The Effects of Oil Spill and Clean-up on Dominant US Gulf Coast Marsh Macrophytes: a Review. *Environmental Pollution* 108, pp. 129-139.
- Prince, R.C., Bare, R.C., Garret, R.M., Grossman, M.J., Haith, C.E., Keim, L.G., Lee, K., Holtom, G.J., Lambert, P., Sergy, G.A., Owens, E.H., Guenette, C.C. (2003). Bioremediation of Stranded Oil on an Arctic Shoreline. *Spill Science & Technology Bulletin*, Vol. 8, No. 3, pp. 303-312.
- Ramsay, M.A., Swannel, R.P.J., Shipton, W.A., Duke, N.C., Hill, R.T. (2000). Effect of Bioremediation on the Microbial Community in Oiled Mangrove Sediments. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 41, No. 7-12, pp. 413-419.
- Reed, M. (1989). Physical Fates Component of Natural Resources Destruction Assessment Model System. *Oil & Chemical Pollution*, Elsevier Science Publisher Ltd, England.
- Triatmodjo, B. (1999). Teknik Pantai. Beta Offset, Yogyakarta.
- Wrabel, M.L., Peckol, P. (2000). Effects of Bioremediation on Toxicity and Chemical Composition of No. 2 Fuel Oil: Growth Responses of the Brown Alga *Fucus vesiculosus*. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 40, No. 2, pp. 135-139.